

X カット LiNbO₃ を用いた光周波数シフタ/SSB-SC 変調器の開発

日隈 薫[†] 橋本 義浩[†] 及川 哲[†] 川西 哲也[‡] 井筒 雅之[‡]

[†]住友大阪セメント株式会社新規技術研究所
〒274-0123 千葉県船橋市豊富 585

[‡]通信総合研究所
〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

E-mail: [†]KAORU_HIGUMA@sits.soc.co.jp, [‡]{kawanishi, izutsu}@crl.go.jp

あらまし ニオブ酸リチウム (LN) 結晶を用いて作製される、光 SSB-SC(Single Side-Band with Suppressed Carrier)変調器は、今後ますます大容量化する DWDM システムを構築する上で有用なデバイスである。以前、我々は z カット LN 結晶を利用して SSB-SC 変調器の開発を行ったが、電極構成上の理由から駆動系が複雑になる問題があった。今回、駆動系の簡略化を目的として、x カット LN を使用した SSB-SC 変調器を開発したところ、キャリア抑圧比 (1 次側帯波とキャリアの比) 28dB と、良好な評価結果が得られたので報告する。

キーワード x カット LN、SSB-SC 変調器、キャリア抑圧比、周波数シフタ

The Development of X-cut LiNbO₃ Optical Frequency Shifter / SSB-SC Modulator

Kaoru HIGUMA[†], Yoshihiro HASHIMOTO[†], Satoshi OIKAWA[†], Tetsuya KAWANISHI[‡],
and Masayuki IZUTSU[‡]

[†]New Research Laboratories, Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd
585, Toyotomi-cho, Funabashi-shi, Chiba, 274-8601 Japan

[‡]Communications Research Laboratory
Kita-cho 4-2-1, Nukui, Koganei-shi, Tokyo, 184-8795 Japan

E-mail: [†]KAORU_HIGUMA@sits.soc.co.jp, [‡]{kawanishi, izutsu}@crl.go.jp

Abstract Optical SSB-SC(Single Side-Band with Suppressed Carrier) modulator using LiNbO₃ crystal is a promising device to develop the future DWDM systems. Authors have developed an SSB-SC modulator using z-cut LiNbO₃(LN), however the set-up for driving it is rather complex. In this study, an SSB-SC modulator using x-cut LN was newly developed. It can be driven by a simple set-up and 28dB sideband/carrier suppression ratio was achieved.

Key words X-cut LiNbO₃, SSB modulation, Carrier suppression ratio, Frequency shifter

1. はじめに

現在、インターネット通信の需要増大にともなう基幹系ネットワークの大容量化、長距離化が検討されている。しかし、ファイバの波長分散性や非線形効果など、様々な物理的要因によって、大容量で長距離伝送可能なシステムの実現は困難な状況にある[1]。各研究機関はこの限界を打ち破るべく、利用可能波長帯域の拡大、周波数利用効率の増大、非線形効果耐性増大（長距離化）、などの側面から、それぞれ新規変調方式や新規ファイバ等光部品の開発を精力的に行っている[2]。最近、Sバンド帯の増幅器の開発によって使用波長域を拡大した上で、偏波多重方式を採用して周波数の利用効率を倍増させることによって、超大容量の伝送実験に成功した例等報告された[3]。しかし、偏波分散の影響で長距離伝送が困難であるなどの問題も残っている。通信ネットワークノード部における電子デバイスの情報処理能力が大容量化のボトルネックになっているという問題も合わせて、まだまだ今後のネットワーク構築には技術検討する余地があるといえる。

一般に、周波数利用効率（大容量化）と非線形耐力（長距離化）はトレードオフの関係にあるため、これらを両立しうる変調方式の実現は難しい。ところで、キャリア抑圧光単側波帯（SSB-SC：Single Side-Band with Suppressed Carrier）変調方式は、デジタル信号の占有するスペクトル幅を半減せしめ、同時にキャリアを抑圧することが可能なことから、高い周波数利用効率と非線形耐力とを兼ね備えた有望な変調方式の一つである[4]。筆者らは、以前、zカットLiNbO₃（zcut-LN）基板を使用して、良好なキャリア抑圧特性を持つ光SSB-SC変調器の開発に成功した[5]。ところが、zcut-LNの最も電気光学効果の大きな結晶軸方向（z軸）は基板に対して垂直であり、対称なコプレナー構造の電極配置を採用するためには、全ての導波路上に信号電極を作製する必要があった。そのため、駆動用の電子部品点数が増えて系が複雑化する、入力信号の位相調整が困難になる等、実用上不都合な問題が生じた。本研究では、駆動系の簡略化を主な目的として、新たにxcut-LN基板を利用したSSB-SC変調器を開発し、10GHzシングルトーン及び12Gb/sデジタルデータに対する変調性能を評価した。さらに、本変調器をシングルトーンで変調する場合においては、単一の側帯波スペクトルのみ残存しうるので、光周波数シフタとみ

なすことができるので、将来のフォトニックネットワークを構成する光機能素子としての応用もいくつか検討した。

2. SSB-SC 変調器の構成および原理について

本変調器は、図1に示す通り、2つのサブMZ（Mach-Zehnder）導波路 MZA、MZb がメイン MZc の各アームに並列に配置された入れこ型 MZ 構造を有している⁴⁾。

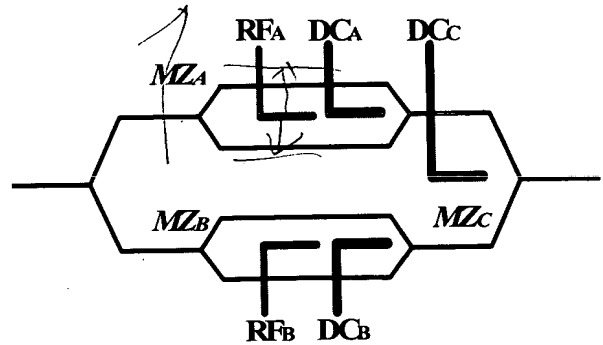


図1. x-LN 光 SSB-SC 変調器の導波路構成

もともと SSB 変調技術は無線通信領域で活用されていた技術であり、原信号とヒルベルト変換された原信号の和をとることによって SSB 変調信号が得られることが知られている。図1の変調器がいかにより SSB-SC 信号を発生するのか簡単に述べる。まず、入射光を $\exp(j\omega t)$ とし、単一周波 RF 信号 $\phi \cos \Omega t$ を RFA ポートから、この信号のヒルベルト変換形である $H[\phi \cos \Omega t] = \phi \sin \Omega t$ を RFB ポートからそれぞれ同時に入力する（ $\sin \Omega t = \cos(\Omega t + \pi/2)$ であるから、マイクロ波用移相器を利用することによって、2信号を同時に供給できる）。ただし、 ϕ は変調度、 ω 、 Ω はそれぞれ光波と RF 信号の角周波数を表す。さらに DCa ポートから適当なバイアスを加えて MZc の両アームを透過する光波間に位相差 $\pi/2$ を与える。同時に、MZA、MZb の両アームを透過する光波間に、キャリアを抑圧するべく位相差 π を与えると、最終合波地点での光波を表す式は、

$$\begin{aligned} & e^{j\omega t} \{ (e^{j\phi \cos \Omega t} + e^{-j\phi \cos \Omega t}) e^{j\pi} \} \\ & + (e^{j\phi \sin \Omega t} + e^{-j\phi \sin \Omega t}) e^{j\pi/2} \} \\ = & e^{j\omega t} \{ J_0(\phi) e^{-j3\Omega t} + J_{+1}(\phi) e^{j\Omega t} \} \quad (1) \end{aligned}$$

と表される（4次以降の成分は無視）。このとき、導波路各点で、光スペクトル成分は図2のように表さ

れる。-3次と1次スペクトル成分は残存するが、0次を含めた偶数次及び-1次の成分は失われていることが分かる。-3次の成分が十分小さければ、あたかもキャリア周波数が Ω だけシフトしたような信号スペクトルが得られることが分かる。

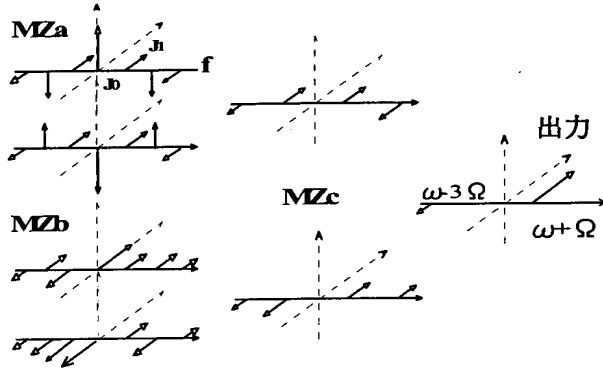


図2. 導波路各点での光スペクトル

4. 変調器の作製

4.1 作製工程

ここでは、変調器の作製方法について簡単に述べる。まず、直径4"厚さ1mmのxcut-LN基板上に、フォトリソグラフィ技術を用いてレジスト導波路パターンを形成する。次に真空蒸着器を用いてTi薄膜を基板上に約900Å堆積させ、これをリフトオフした後、1000℃・20時間の条件下で熱拡散する。この後、サブMZa、MZbに対して、進行波型のコプレーナ電極RFa、RFb及び光波位相調整用DC電極DCa、DCbを直列に1ヶ所ずつ、MZcに対してはDC電極DCcを1ヶ所、それぞれ各MZ導波路干渉計の対向するアームの中間位置に、電界Auメッキ法を利用して作製する。電極は高周波対応のために、厚さ約25μmとした。基板から切り出されたチップ両端にファイバを固定し、これをSUS303製の筐体に気密封止して変調器の完成となる。SSB-SC変調器の外観を図3に示す[6]。

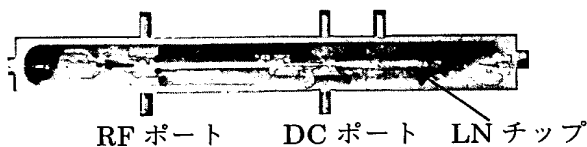


図3. SSB-SC変調器外観

3.2 xcut-LN基板利用のメリット

xcut-LN変調器にはDCドリフトが小さい、シングル駆動でゼロチャープ、といった長所があるが、

光とマイクロ波の速度整合が困難であり、駆動電圧が若干高くなる短所もある。一方、zcut-LN変調器には、速度整合が容易であり、駆動電圧が低いという長所がある反面、(シングル駆動の場合)チャープが存在する、DCドリフトがやや大きいといった短所もある。それぞれ長短兼ね備えているわけであるが、適用領域で何を重視するかに応じて使い分けられている。このことは今回報告のSSB変調器についても同様である。

これまでの開発では駆動パワーの低減を考慮して、zcut-LN基板を使用してきた。しかし、4本の導波路アームを透過するそれぞれの光波に、正確に同強度の電界を与え、かつ精度良く位相調整をする必要があり(調整しないと変調度がばらつき、シャープな片側波帯変調特性が得られない)、信号電極を4本のアームそれぞれに設置しなければならなかった。そのため、入力信号駆動用の増幅器や移相器、減衰器等の電子部品やコネクタの数は、信号電極の分だけ必要となる。一方、xcut-LN基板を利用した場合、z軸方位が基板面に平行でかつ導波路進行方向に対して垂直であるため、図1のようにMZ干渉系の中心位置に信号電極を設置すれば、その対称性から、一つの信号電極によって、2つの導波路に同強度の電界を同時に与えることが出来る(=シングル駆動でゼロチャープ)。つまりzcut-LNでは4本必要であった信号電極(Hot電極)が、xcut-LNでは2本あれば十分となる。図4にxcut-LN-SSB-SC変調器、zcut-LN-SSB-SC変調器両方のチップ断面図を示す。xcut-LNでは信号電極が少ない分、電子部品数、調整箇所とも少なくなり、よりシンプルな駆動系になりうるということが分かる。

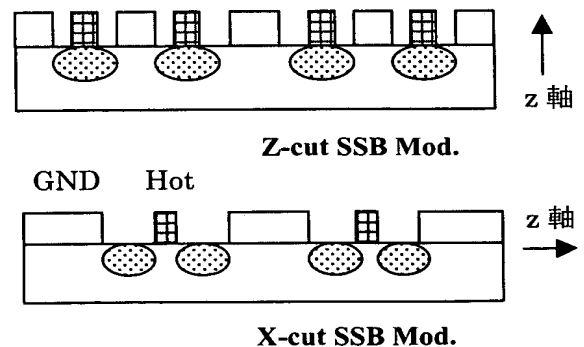


図4. x-LN SSB-SC変調器とz-LN SSB-SC変調器のチップ断面図(a)z-LN (b)x-LN

4.性能評価

4.1 10GHz シングルトーン（光周波数シフタ）

実際に図 5 に示される駆動系を用いて、今回開発した xcut-LN SSB-SC 変調器の 10GHz 単一周波に対する、キャリア抑圧（ J_1/J_0 ）及び側波帯抑圧（ $J_1/J-1$ ）特性を調べた。入力した光キャリアの周波数は約 192.98THz（ $\lambda \approx 1554\text{nm}$ ）であった。

図 6 (a)・(b)に測定した出力光スペクトルを示す。上側波帯変調、下側波帯変調いずれにおいても、キャリアは抑圧され 1 次の側波帯ピークがキャリアの位置から、ちょうど 10GHz ずれた位置に現れていることが分かる。また、キャリア抑圧比は 28dB、側波帯抑圧比は 23dB であった。この時の駆動電圧は約 8.0Vp-p で、xcut-LN 変調器（6.2Vp-p）に比べると若干高めであったが、キャリア抑圧度は xcut-LN（21dB）に比べて大きかった。これは、xcut-LN の場合に比べ、MZ 導波路にかかる電界のバランスが良いためと考えられる。この評価結果より、本変調器が光周波数シフタとして十分な性能を持っていることが分かった。

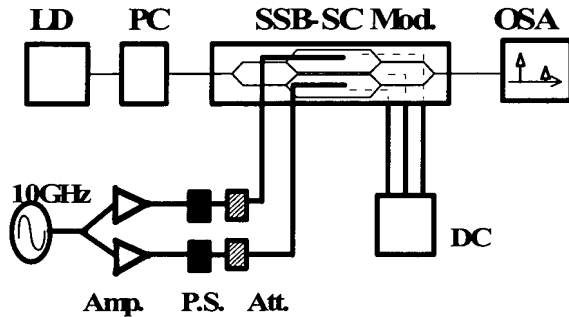
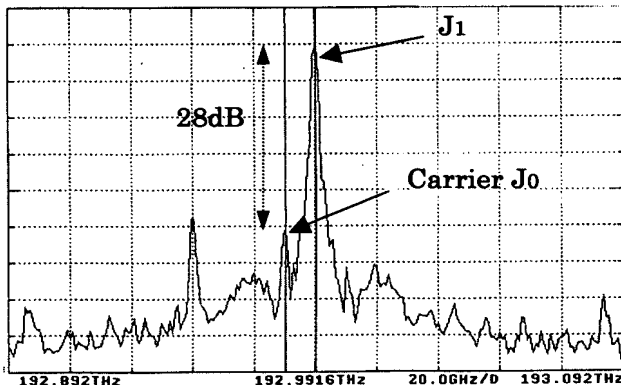
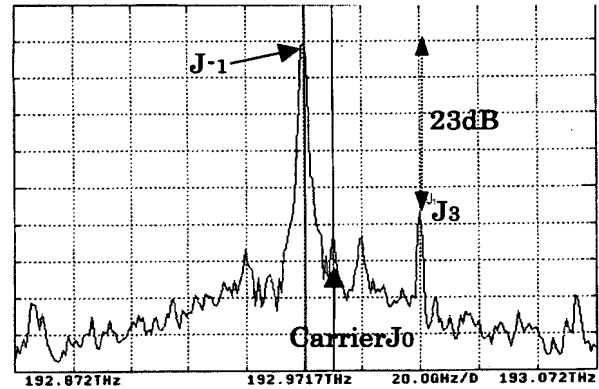


図 5. 光周波数シフタ駆動系



(a) upper sideband



(b) lower sideband

図 6. 10GHz 単一周波に対する SSB-SC 変調スペクトル(a)キャリア(b)上側波帯変調(c)下側波帯変調

4.2 12Gb/s デジタルパルスパターン

次に 12Gb/s のランダム疑似パルス（ $2^{31}-1$ ）NRZ 信号の入力に対する、SSB-SC 変調後の出力光スペクトルについて調べた。この測定に用いた系を図 7 に示す。図中の 90° ハイブリッド（Krytar 社製 1-18GHz 対応）は、入力パルスを各周波数成分に分解して、そのままの成分と、 90° の位相差を与えた成分の二つに分離出力するデバイスである。パルスパタンジェネレータより送られてきたデジタル信号を、RF アンプによって 3Vp-p まで増幅した後、この 90° ハイブリッドに入力し、一方の出力を変調器の RFA ポートから、もう一方の出力を RFB ポートから入力する。このとき得られた下側波帯変調光スペクトルを図 8 に示す。図を見てわかる通り、従来強度変調に比べ、被変調信号の占有帯域が約 60%に減少しているのと同時にキャリア光の強度を自由に制御できることが分かった（図では 3 段階のキャリアレベルで変調がかけられた様子が見える）。この結果より、本変調器は、波長多重通信において、より周波数利用効率の高い変調方式を提供しうるデバイスであると言える。

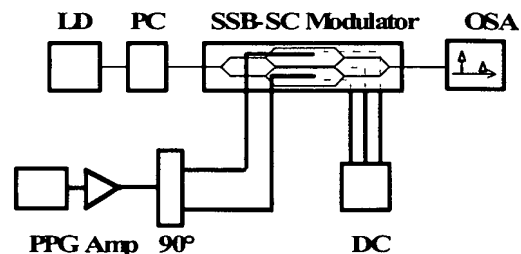


図 7. デジタル信号に対する SSB-SC 変調駆動系

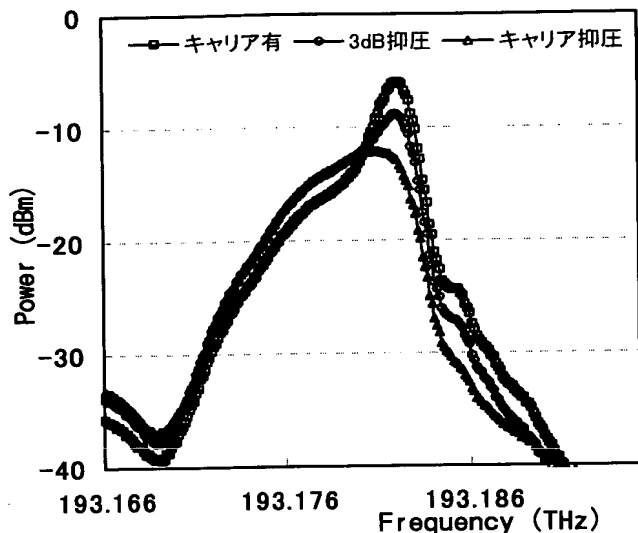


図 8. 12Gbit/s デジタルパルスバタンの SSB-SC 変調スペクトル

5. 応用

4.の結果に見られた通り、本変調器はシングルトーンの信号を供給した場合、光スペクトルの1次成分を強調した上で、キャリア及び高次の成分を十分抑圧することができることから、投入した信号の周波数に応じて光周波数をシフトすることが可能な光周波数シフタとしての機能することができる。このことを利用して、様々な光機能素子としての応用が考えられる。例えば図9は、本変調器とFBGとを組み合わせることによって、可変光ディレー素子として利用した場合の例を示している[7]。これは、2つのサーキュレータとその間に設けたファイバブラッググレーティング (FBG) 及び、ファバループ (SSB-SC 変調器とアンプを含む) から成るシンプルな構成を取っている。FBGの反射帯域内にある光は光ループ内に入らず、そのまま出力されるのに対し、反射帯域外の光は光ループ内を周回した後、SSB-SC 変調器によって反射帯域外の周波数にシフトされたときのみ、遅延時間を与えられて出力されるしくみとなっている。このほかにも、高速スイッチや周波数標準器など様々な応用が考えられ、将来のフォトニックネットワークを構築する上で、有用なデバイスになりうる可能性があるといえる。

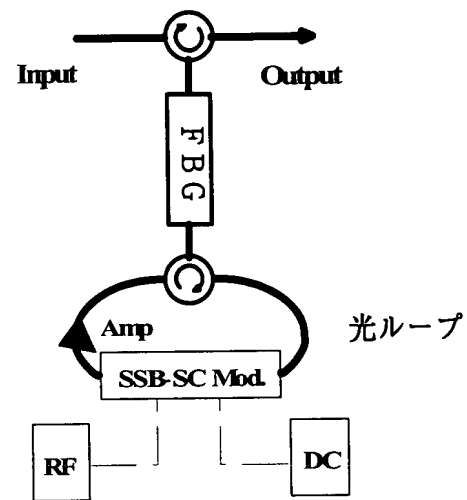


図 9. SSB-SC 変調器を用いた可変光ディレー

6. まとめ

Xcut-LN 結晶を利用して光 SSB-SC 変調器を作製することにより、駆動系の簡略化に成功した。また、本変調器が 12Gbit/s の情報の占めるスペクトル領域を 60%まで減少させること、同時にキャリアの強度もコントロールできることを示し、波長多重通信における周波数利用効率の向上や非線形耐力の向上に寄与する可能性を示した。また、光周波数シフタとしても、キャリア抑圧比 28dB の良好な性能を備えており、将来のフォトニックネットワークを構築する上で有用なデバイスとなりうることを示した[8]。

文 献

- [1] T.Ito, *et.al*, "3.2Tb/s-1500km WDM transmission experiment using 64nm hybrid repeater amplifiers", OFC2000, PD-24
- [2] T.Ono, "DWDM systems: what is to be achieved", Contemporary Photonic Technologies 2001 technical digest, pp125-128
- [3] 福知清 他, "3 波長帯を用いた 10.92Tb/s WDM 光中継伝送実験" 2001 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 分冊 2, no.B-10-90, pp.428, Sept.2001.
- [4] M.Izutsu, S.Shikama, and T.Sueta, "Integrated optical SSB modulator/frequency shifter", IEEE J.Quantum. Electron, Vol.QE-17, No.11, pp2225-2227, Nov.1981.
- [5] S.Shimotsu, S.Oikawa, T.Saitou, N.Mitsugi, K.Kubodera, T.Kawanishi, and M.Izutsu, "LiNbO3 optical single-sideband modulator", OFC2000, PD-16
- [6] K.Higuma, S.Oikawa, Y.Hashimoto, H.Nagata and M.Izutsu, "X-cut lithium niobate optical single-sideband modulator", ELECTRONICS LETTERS, Vol.37, No.8, pp515-516,

April 2001

- [7] 川西哲也 他, “光 SSB 変調器を用いた可変光ディレイ”
2002 電子情報通信学会通信総合大会, 発表予定
- [8] Y.Ozeki, et. “156Mb/s DPSK Optical MM-Wave Transmission
Employing a 60GHz Optoelectronic Image Reduction Mixer”,
Tech.Dig. of International Topical meeting on Microwave
Photonics, WE1.4, pp137-140, 2000